

Обоснование выбора быстродействия устройств измерения реактивности

О. А. КОМШИЛОВ

На основе метода имитационного моделирования получены оценки погрешности измерения реактивности в зависимости от быстродействия преобразователя с интегрированием входного сигнала и преобразователя с постоянным временем измерения без интегрирования.

Ключевые слова: атомная энергетика, кинетика ядерного реактора, реактивность, частота дискретизации, имитационное моделирование.

The estimations of an error of reactivity measurement in dependence on speed operation of the converter with the integration of an input signal and of the converter with constant time of measurement without integration made on the basis of a method of simulation modelling are given.

Key words: atomic energy industry, nuclear reactor kinetic, reactivity, sampling rate, simulation modelling.

В [1] приведены оценки погрешности измерения реактивности в зависимости от шага (частоты) дискретизации, диапазона измеряемого параметра, шумов квантования, аддитивных шумов измерительного тракта, а также от измеряемой реактивности.

Однако, кроме перечисленных характеристик измерительного устройства и параметров исследуемого сигнала, практический интерес представляет анализ погрешности измерения реактивности в зависимости от быстродействия применяемых приборов, по отсчетам с которых вычисляется реактивность. Таким образом, задачу анализа можно сформулировать так: для заданного диапазона изменения измеряемого параметра (тока, напряжения, последовательности импульсов) и заданного значения измеряемой реактивности получить удобные для практического использования оценки погрешности измерения реактивности в зависимости от быстродействия измерителя.

В данной статье приведены результаты анализа погрешности измерения реактивности для двух вариантов построения указанных измерителей: первый — на основе устройства, которое интегрирует измеряемый сигнал в течение постоянного интервала времени [2], и второй — на основе измерения процесса за некоторый постоянный интервал времени, например, с помощью АЦП поразрядного уравнивания.

Первый вариант. На практике часто необходимо создать помехоустойчивую аппаратуру, способную исключить влияние внешних помех на результаты измерения. При этом основная задача состоит в подавлении сетевой помехи $f_c = 50$ Гц, а также детерминированных сигналов на частотах, кратных частоте питающей сети. Поэтому практический интерес представляет оценка погрешности измерения реактивности в тех случаях, когда реализован вариант построения устройства, при котором $\Delta t = 1/f_d = \tau = k/f_c$, где

$k = 1, 2, \dots$; Δt — шаг дискретизации; f_d — частота дискретизации входного сигнала; τ — шаг интегрирования входного параметра.

В данном варианте построения измерителя значения сигнала $x(t)$ в дискретные моменты времени $t = i\Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots$), по которым вычисляют реактивность, определяются по формуле

$$x(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_{i+1}} v(t) dt, \quad (1)$$

где $\tau = t_i - t_{i+1}$ — шаг (время) интегрирования;

$$v(t) = v(t_0) \sum_{j=1}^7 A_j e^{\omega_j t} \quad (2)$$

— входной измеряемый параметр; A_j , ω_j — коэффициенты, определяемые по известным формулам [3].

Соотношение (2) является решением во временной области уравнения одноточечной кинетики ядерного реактора при мгновенном скачке реактивности.

После несложных преобразований выражение (1) с учетом (2) принимает вид

$$x(t) = v(t_0) \sum_{j=1}^7 A_j e^{\omega_j t} \frac{e^{\omega_j \tau} - 1}{\omega_j \tau}. \quad (3)$$

Соотношение (3) использовали для оценки погрешности измерения реактивности в зависимости от времени интег-

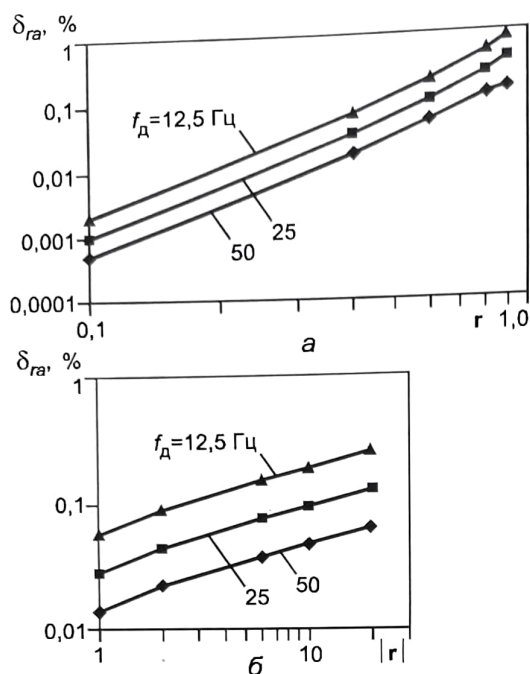


Рис. 1. Зависимости $\delta_{ra}(r)$ для $f_d = 1/\tau$ и $n = 3$:
а — $r > 0$, б — $r < 0$

рирования. Необходимые расчеты были выполнены для следующих исходных данных.

1. Входной сигнал $x(t)$ (3), по дискретным значениям которого в моменты времени $t = i\Delta t$ ($i = 0, 1, \dots$) вычисляется реактивность.

2. Реактивность, для расчета которой использовали соотношение (1) из [1].

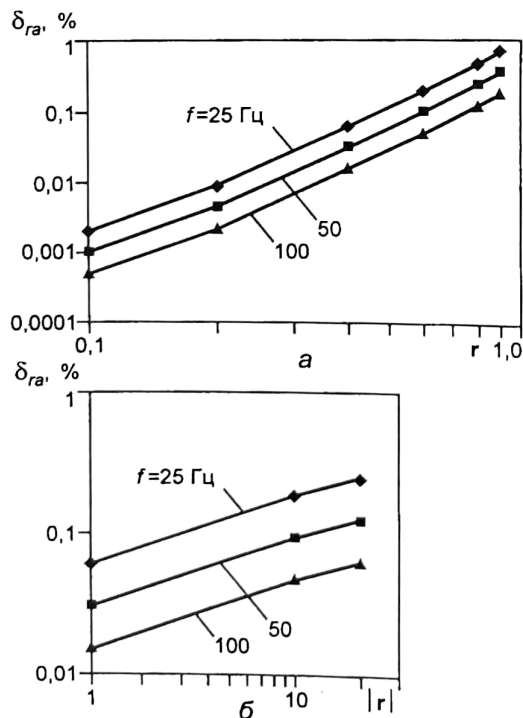


Рис. 2. Зависимости $\delta_{ra}(r)$ для $f_d = 25$ Гц и $n = 3$:
а — $r > 0$, б — $r < 0$

3. Погрешность измерения реактивности только при конечном времени интегрирования τ измерительного преобразователя, которую определяли по формуле

$$\delta_{ra} = \max |\delta_r(t) - \delta_{r\tau}(t)|. \quad (4)$$

В качестве меры оценки погрешности δ_r измерения реактивности принимали

$$\delta_r(t) = \frac{r_f(t) - r_v}{r_v} 100\%,$$

где r_v — действительное (заданное, постоянное) значение реактивности, по которому вычисляют коэффициенты A_j и ω_j в соотношении (2); $r_f(t)$ — реактивность, вычисленная по соотношению (1) из [1] для сигнала вида (3) при шаге дискретизации Δt и $\tau = 0$, т. е. $\delta_r(t)$ — это погрешность измерения реактивности без учета быстродействия измерительного устройства, и

$$\delta_{r\tau}(t) = \frac{r_{f\tau}(t) - r_v}{r_v} 100\%,$$

где $r_{f\tau}(t)$ — реактивность, вычисленная по соотношению (1) из [1] для сигнала вида (3) и $\tau = \Delta t$.

Таким образом, погрешность δ_{ra} является дополнительной погрешностью измерения реактивности с учетом быстродействия измерительного преобразователя.

4. Диапазон изменения параметра $v(t)$, в пределах которого вычисляли реактивности $r_f(t)$ и $r_{f\tau}(t)$:

$$D = \begin{cases} \text{от } 10^{-(n-1)} \text{ до } 10 \text{ для } r > 0; \\ \text{от } 10 \text{ до } 10^{-(n-1)} \text{ для } r < 0, \end{cases}$$

где $n = 3, 4$ и 5 .

5. Диапазон изменения параметра t , в пределах которого определяли погрешности измерения реактивности, $0,1t_{\text{изм}} < t < t_{\text{изм}}$, где $t_{\text{изм}}$ — время, соответствующее изменению параметра $v(t)$ в диапазоне D .

Кроме погрешности δ_{ra} , представляет интерес погрешность для вполне конкретного момента времени измерения реактивности, а именно для $t = t_{\text{изм}}$, т. е. погрешность измерения реактивности в установившемся режиме (в конце интервала измерения) для заданного числа декад n . Итак, указанные выше погрешности в дальнейшем будут иметь следующие обозначения: δ_{ra} — погрешность определения реактивности по соотношению (4), δ_{rt} — погрешность $\delta_{r\tau}(t)$ при $t = t_{\text{изм}}$.

На рис. 1, а и б приведены зависимости погрешности δ_{ra} измерения реактивности r от $f_d = 1/\Delta t = 1/\tau = 50; 25; 12,5$ Гц и $n = 3$. Подобные зависимости были получены для $n = 4$ и 5 , что позволило вывести приближенные соотношения

$$\delta_{ra} \approx \begin{cases} \frac{k_1 r^3}{n f_d}, \%, \text{ для } r > 0; \\ \frac{k_2}{f_d} \sqrt{|r|}, \%, \text{ для } r < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $k_1 = 40$, $k_2 = 2$ — постоянные коэффициенты, Гц. Соотношения (5) получены для следующих диапазонов изменения реактивности: для отрицательных реактивностей

тей в диапазоне $-20 < r < -0,1$, а положительных реактивностей $-0,9 > r > 0,1$. Заметим, что для больших по модулю значений реактивностей выполняется соотношение $\delta_{ra} \approx 1,5\delta_{ra}$, тогда как для малых по модулю значений реактивностей $\delta_{ra} \gg \delta_{ra}$ и $\delta_{ra} \rightarrow 0$.

Второй вариант. Пусть в качестве измерителя параметра $v(t)$ сигнала датчика используется преобразователь с постоянным временем преобразования θ . В этом случае значения сигнала, по которым вычисляют реактивность:

$$x(t) = v(t_0) \sum_{j=1}^7 A_j e^{\omega_j(t+t_0)}, \quad (6)$$

где $t = i\Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots$).

Погрешности измерения реактивности в данном случае вычисляли также по соотношению (1) из [1] и при тех же условиях, что и для первого варианта.

На рис. 2, а и б приведены зависимости погрешности δ_{ra} измерения реактивности r применительно к сигналу вида (6) в зависимости от параметра $f = 1/\theta = 25, 50$ и 100 Гц, $n = 3$ и $f_d = 25$ Гц. Подобные зависимости были получены также и для $n = 4$ и 5 , что позволило вывести следующие приближенные соотношения:

$$\delta_{ra} \approx \begin{cases} \frac{k_3 r^3}{n^{3/2} f}, \%, \text{ для } r > 0; \\ \frac{k_4 |r| \sqrt{n}}{n f}, \%, \text{ для } r < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $k_3 = 100$, $k_4 = 3$ — постоянные коэффициенты, Гц.

Несмотря на то, что приведенные на рис. 2 результаты, а также выражения (7) получены для $f_d = 25$ Гц, данные зависимости справедливы и для других частот дискретизации. Расчеты, выполненные для частот дискретизации в диапазоне $1-100$ Гц, показали, что погрешность δ_{ra} при выбранной модели оценки погрешности измерения реактивности вида (4) практически не зависит от f_d .

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисов В. Ф., Комшилов О. А.** // Измерительная техника. — 2002. — № 10. — С. 49.
2. **Мысенков А. И., Шастин К. В.** Расчет параметров кинетики реактора с повышенной точностью / ФЭИ. — Обнинск, 1980. — Препринт № 1016.
3. **Харрер Дж. М.** Техника регулирования ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1967.

Дата одобрения 16.09.2002 г.